

MODELO DEMOGRÁFICO DINÁMICO PARA EL PEJERREY *Odontesthes bonariensis*

L. R. FREYRE

Instituto de Limnología "Dr. Raúl A. Ringuelet"
lafreyre@netverk.com.ar

RESUMEN

Se describe un modelo demográfico dinámico para el pejerrey, *Odontesthes bonariensis*, que trata separadamente el crecimiento y la supervivencia. Fue verificado comprobándose que mostraba un comportamiento adecuado con las hipótesis planteadas. Algunos de los subsistemas fueron calibrados con datos obtenidos en la laguna Lacombe (partido de Chascomús) y en la Laguna de Monte (partido de San Miguel del Monte). Todo el modelo fue desarrollado en una planilla de cálculo en una PC estándar. El modelo considera las variables de estado de 20 cohortes separando los nacidos en los desoves de otoño y primavera. Para describir el medio se simulan la lluvia, la alternancia entre plancton e hidrófitas, los nutrientes libres, el bentos, los peces relacionados por su trófica con el plancton y aquellos relacionados con el bentos. Se presentan los diagramas de los distintos subsistemas y su comportamiento. Finalmente se muestra parte de una simulación efectuada por el modelo completo y se destacan las posibilidades de estudio estadístico para completar la calibración. El modelo se comporta en forma estable. En caso de ser validado, permitiría por un lado pronosticar acerca del futuro probable de una población y/o deducir respecto de los acontecimientos históricos recientes que afectaron su estado actual.

Palabras Clave: pesquería; modelo; dinámica; simulación; producción, pejerrey.

INTRODUCCIÓN

Con la intención de contar con una herramienta para diagnosticar acerca de la productividad pesquera de una laguna se está desarrollando un modelo centrado en la población de Pejerrey. En esta contribución se realiza una presentación previa de los avances alcanzados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a la extensión y a lo heterogeneo de los temas tocados, el origen de la información utilizada (material) y su modo de aprovechamiento (método) se expondrán dentro del título de cada subsistema.

El Medio

Lluvia

Se contó con el registro diario de lluvia en la ciudad de San Miguel del Monte desde el 1 de Enero de 1988 hasta el 28 de Febrero de 1991. Se calculó la frecuencia de casos con diferente cantidad de agua caída en el período de 1155 días, con diferentes intervalos. Fue necesario llegar a un intervalo de 21 mm para obtener una serie en la que todos los intervalos estuvieran representados. A dicho conjunto de datos se ajustó una función exponencial o de recurrencia. Cuando se introdujo una función de azar y la simulación se comparó con los datos originales calculando la frecuencia con un intervalo de clases de 2 mm, resultó un ajuste con un R^2 promedio de 0,996175 y un desvío estándar de 0,0005848 como se observa en las Figuras 1 y 2.

A continuación se obtuvieron las lluvias medias diarias para un año y se calculó una media móvil de 11 días. A estos datos se les ajustó la exponencial de un polinomio de Furrier de orden 4 que se muestra en la Figura 3.

Esta función se utilizó para modular la lluvia simulada por la distribución de recurrencia.

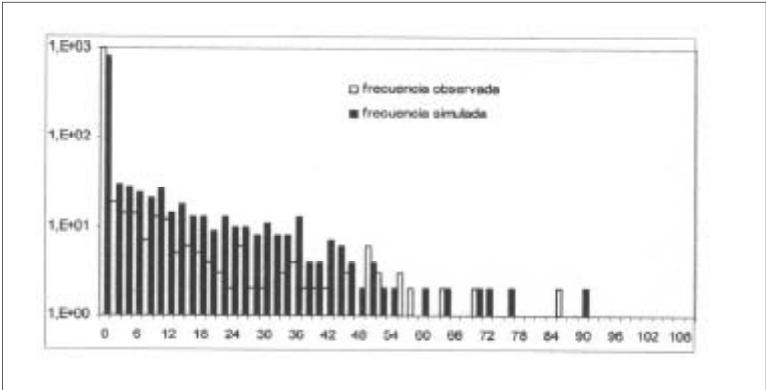


Figura 1. Histograma de frecuencia del n° de días con la cantidad de mm de lluvia caída que se indica en la abscisa.

De este modo se estimaron los valores para la función forzante lluvia que se utilizó en el modelo final y que se comporta como se observa en el gráfico de la Figura 4.

Volumen y forma de la laguna. Se consideró que el flujo de agua que entra a la laguna debía resultar proporcional a la lluvia y al tamaño de la cuenca, mientras que el flujo de salida debía ser proporcional a la altura alcanzada por el agua. Además, que la altura en la escala hidrométrica podía describirse con un polinomio simple (de tercer orden) del volumen acumulado (Figura 5). Se calibró este submodelo con los datos observados.

¿ENSO? Con la intención de analizar la hipótesis de que el fenómeno del niño afecta el comportamiento de las cohortes de pejerrey se agregó una imitación de este a la función lluvia. Se utilizó un sencillo oscilador de tres variables de estado (Figura 6) para generar pulsos de periodicidades variables que sirvieron para modificar la probabilidad de lluvia, llegando eventualmente a duplicarla como muestra la Figura 7.

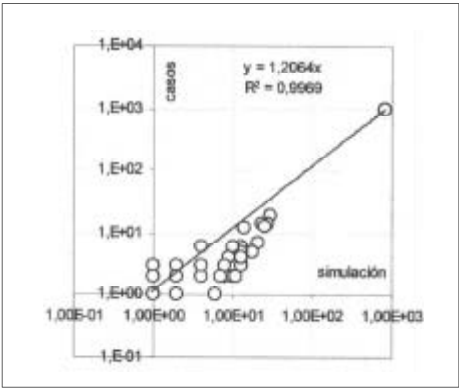


Figura 2. Regresión y correlación entre el n° de casos observados y simulados.

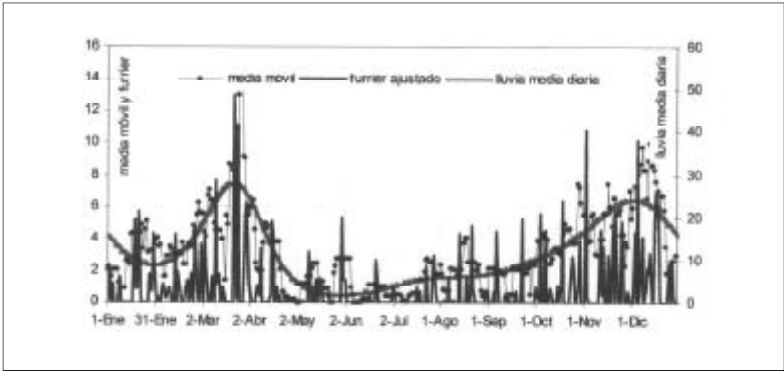


Figura 3. Lluvia media diaria durante el período, media móvil y polinomio trigonométrico ajustado.

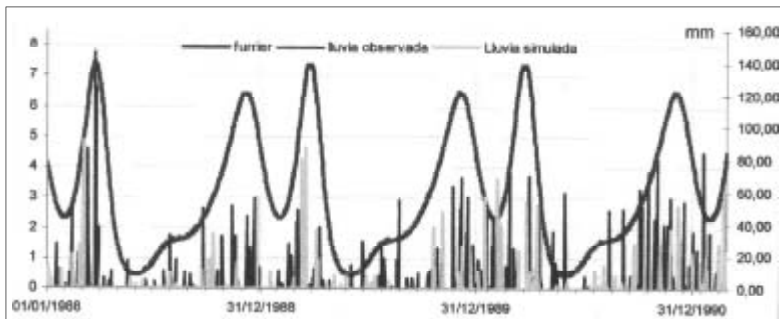


Figura 4. Simulación para el período 1/1/88 al 28/2/91; se muestra en barras grises la lluvia simulada, en barras negras la lluvia observada, ambas respecto al eje de ordenadas de la derecha, y en línea continua el polinomio trigonométrico que modula la probabilidad de lluvia, en el eje de ordenadas de la izquierda.

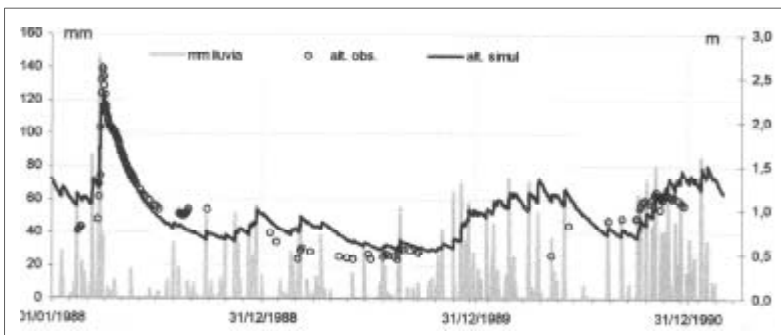


Figura 5. Lluvia observada, líneas grises en mm de lluvia diaria sobre el eje de ordenadas de la izquierda y altura observada (círculos) y simulada (línea continua) sobre el eje de la derecha en metros de la escala hidrométrica.

Plancton

Se contó con 14 recuentos del plancton efectuados en la laguna Lacombe entre el 30/5/97 hasta el 23/10/98 por el Lic. Mauricio Remes Lenicov. Estos fueron transformados a calorías cada 100 litros de agua y ponderados por el coeficiente de retención del pejerrey (Ringuelet 1980). Dichos datos fueron ordenados en función de la época del año y a los mismos se les ajustó la exponencial de un polinomio trigonométrico de Furrier, Figura 8.

Peces del Plancton

De la misma laguna se consideraron peces del Plancton, por su relación trófica (Destéfani y col., 1972), a *Cnesterodon decemmaculatus*, *Cychlasoma fascetum*, *Hyphesobricon anisitsi*, *Oligosarcus jenninsii*, *Astyanax eigenmanniorum*, *Bryconamericus iheringii*, *Jenynsia lineata* y *Cheirodon interruptus*.
Resultaron considerados peces del Bentos *Gimnogeophagus australis* y *Corydoras palea-*

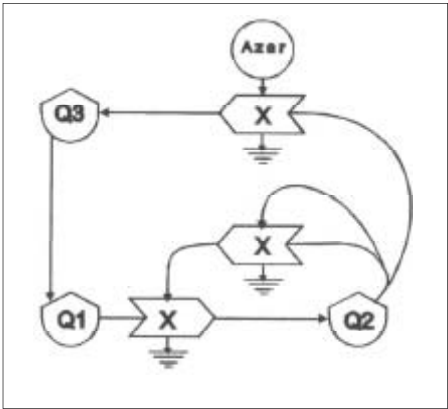


Figura 6. Diagrama de Odum del oscilador de tres variables con una función de azar utilizado para simular el efecto de "El Niño" sobre la probabilidad de lluvia.

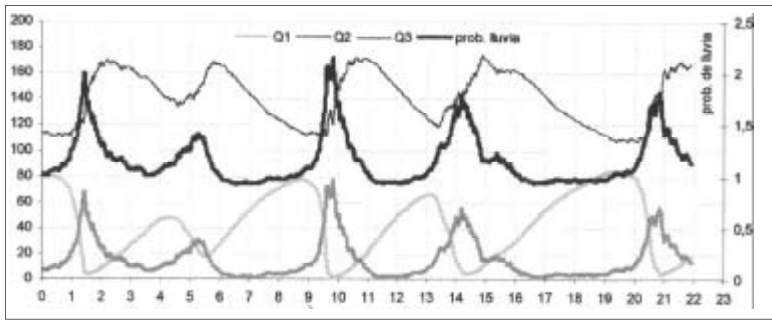


Figura 7. Comportamiento de las tres variables del oscilador (referidas al eje de la izquierda) mediante una simulación que representa 22 años y su efecto sobre la probabilidad de lluvia (prob. de lluvia) sobre la ordenada derecha.

tus. Se intentó un ajuste dinámico entre la energía aportada por el plancton y la biomasa de peces del plancton. Como era de esperar, dado que se agrupan especies de peces de varios niveles tróficos y distinta vida media, fue imposible que la variable Peces del Plancton se comportara con el detalle observado. Sin embargo se obtuvo el ajuste aproximado que se muestra en la Figura 9.

Plancton vs Hidrófitas

Se ensayó el modelo de competencia de la Figura 10 para explicar la alternancia de aguas claras (hidrófitas) y oscuras (plancton).

Se muestra una simulación (Figura 11) donde se aprecia la alternancia obtenida para las variables hidrófitas, plancton y nutrientes, en función de la altura alcanzada por el agua. Obsérvense los excedentes de nutrientes cuando el sistema conmuta de claro (dominancia de hidrófitas) a oscuro (dominancia de plancton).

El pejerrey

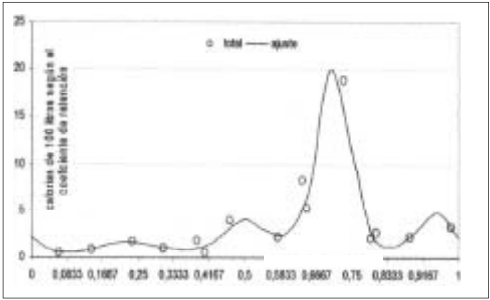


Figura 8. Calorías efectivas para el pejerrey cada 100 litros de agua según los recuentos y polinomio de furrier ajustado. La abscisa en partes de año; cada division corresponde aproximadamente a un mes.

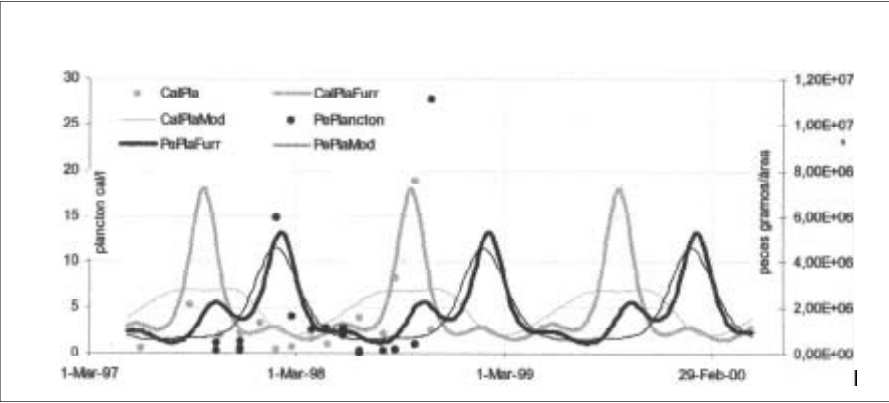


Figura 9. Calorías del plancton (CalPla) según los recuentos y biomasa observada de peces relacionados por su trófica con este (PePlancton). Polinomios de Furrier ajustados para las calorías del plancton (CalPlaFurr) y para la biomasa de peces del plancton (PePlaFurr). Simulación asumiendo una entrada constante al plancton (CalPlaMod) y un comportamiento logístico para los peces del plancton (PePlaMod) ambos afectados por la temperatura y el fotoperiodo.

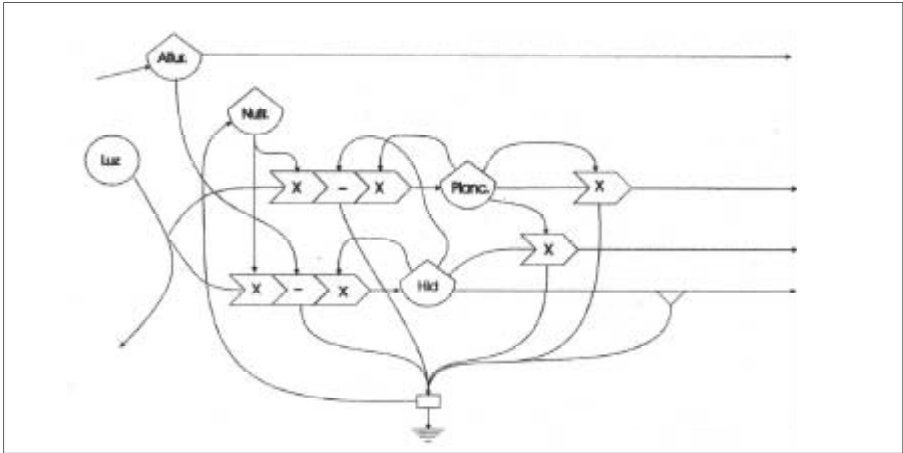


Figura 10.Diagrama de Odum para interpretar la alternancia en la dominancia del plancton (Planc.) y las Hidrófitas (Hid.). El plancton se muestra comportándose en forma logística y su producción frenada por la biomasa de hidrófitas. A su vez estas últimas serían frenadas por la altura del agua (Altur.) y ambas en relación de competencia mutua. Nutr. = nutrientes.

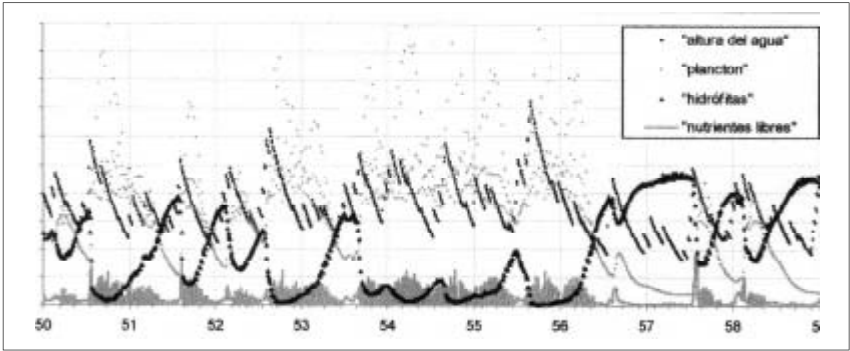


Figura 11. Simulación del submodelo diagramado en la Figura 10. En puntos pequeños negros se muestra la altura del agua generada, en puntos grises la biomasa del plancton, en triángulos negros la biomasa de hidrófitas y en barra grises la cantidad de nutrientes libres.

Respecto del pejerrey sabemos que el contenido energético del plancton anticipa los cambios fisiológicos que experimentará el pejerrey, y aporta más en primavera que en el otoño. Esto se ilustra con los polinomios trigonométricos ajustados a las discrepancias temporales de los pesos observados respecto de los ajustados por los respectivos modelos alométricos (Figura 12).

El modelo de crecimiento individual

Con esta información pudo desarrollarse el modelo para el crecimiento individual del pejerrey (Figura 13) donde se observa que tanto las estructuras neuro-músculo-esqueléticas (Q2) como la energía hepática (Q3) son indispensables para aprovechar la oferta (X), por otro lado la intervención del hígado es necesaria para metabolizar las reservas (Q4) y convertirlas en biomasa del ovario (Q5) que además puede recibir el aporte directo de energía desde el hígado (J8) y finalmente esta se libera en el desove (J5).

De modo que se pudo reconstruir la historia del crecimiento de un individuo y tener datos para calibrar este modelo dinámico. Se ajustó una curva de crecimiento en longitud (Lst) estacionalizada (Pauly 1984). Mediante los polinomios mencionados se obtuvieron las estimaciones del peso eviscerado, del peso del hígado, del peso de la grasa y del peso de las gónadas.

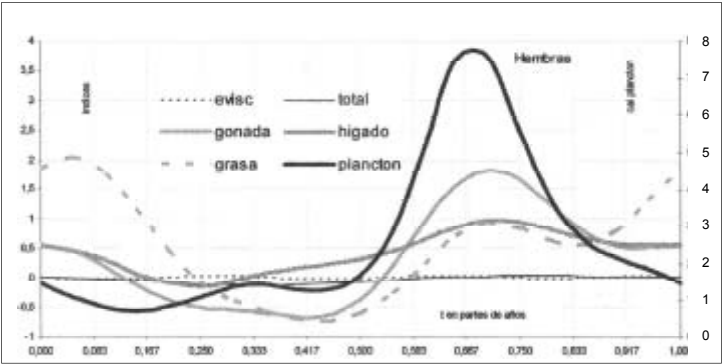


Figura 12. Ajustes de Furrier a la variación estacional de los índices gravimétricos del peso eviscerado (evisc), de la gónada, de la grasa perintestinal (grasa), total y del hígado; y a la energía contenida en el plancton de 100 litros de agua.

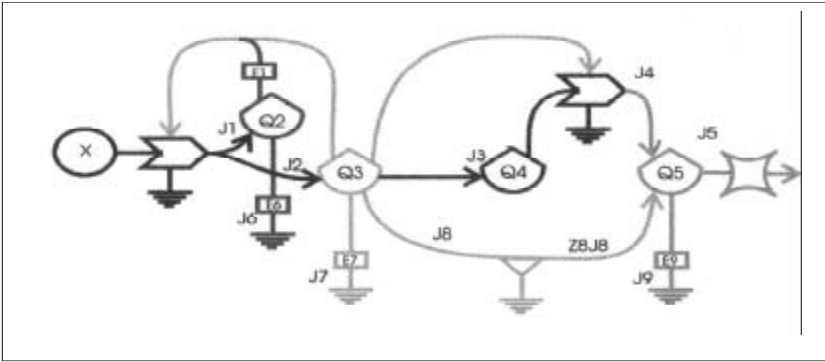


Figura 13. Modelo de crecimiento individual donde Q2 es peso somático, Q3 es peso del hígado, Q4 es peso de grasa y Q5 es peso de la gónada

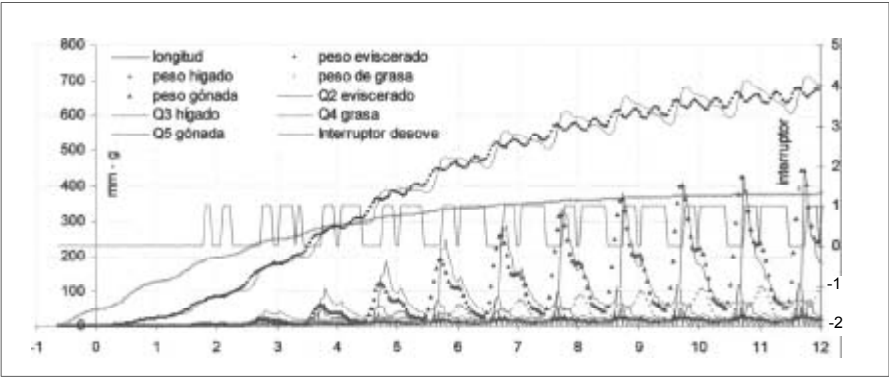


Figura 14. Curva de crecimiento en longitud (mm). Con pequeños círculos se presentan los pesos reconstruidos: eviscerado, del hígado, de la grasa y de las gónadas. Con líneas continuas los valores simulados por el modelo. Longitud y peso referidos a la ordenada de la izquierda. La línea negra quebrada representa los periodos en que el interruptor está abierto (1, desove) o cerrado (0), referida a la ordenada derecha.

Además se pudieron estimar los periodos en que el interruptor del desove está abierto o cerrado según que la derivada del ovario fuese positiva o negativa (Figura 14).

Modelo de supervivencia

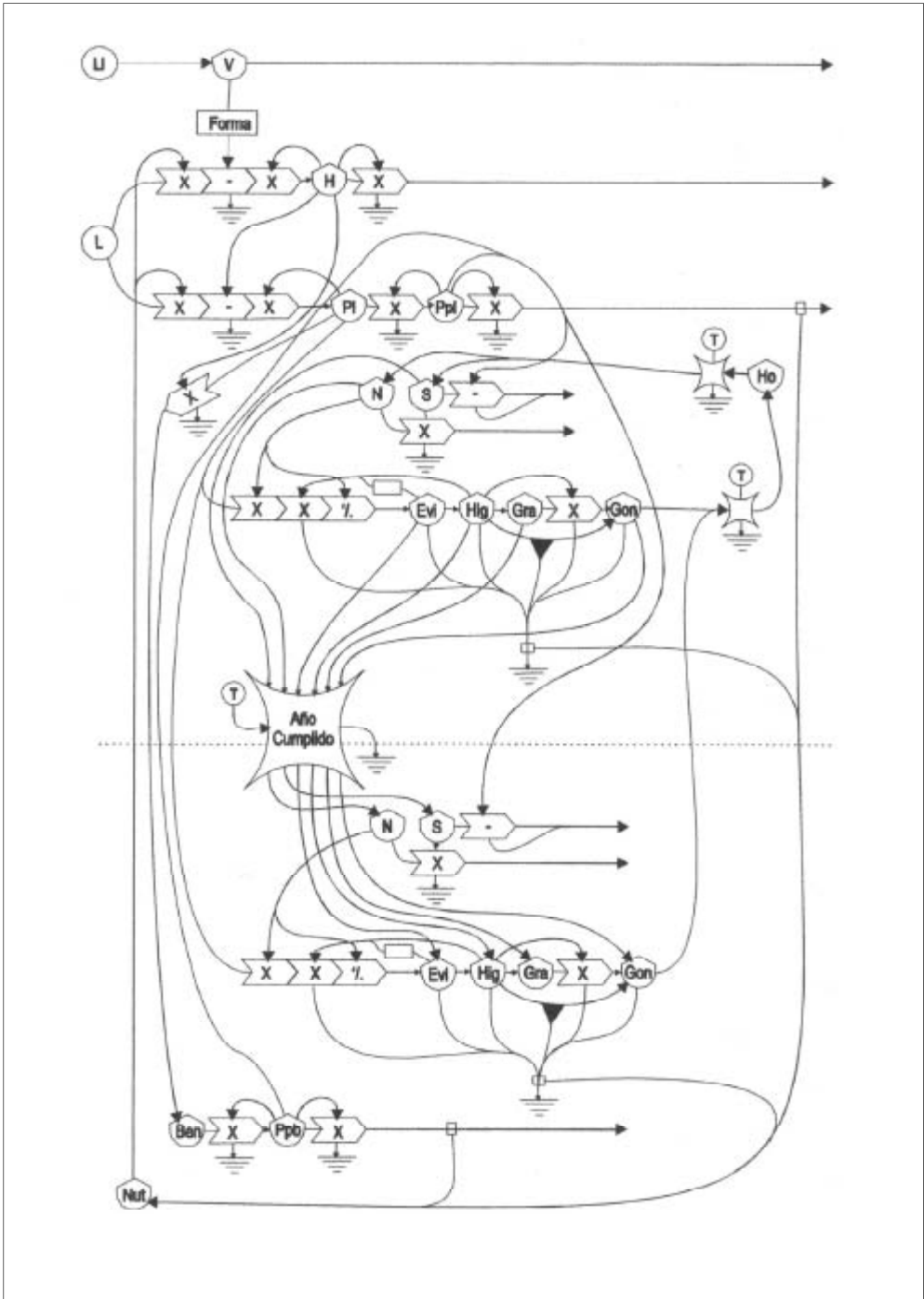


Figura 15. Diagrama de Odum para el modelo. Se han representado solo las cohortes I y II. L1 es lluvia, V es volumen, forma transforma volumen en altura, H es biomasa de hidrófitas, Pl es energía del plancton, Ppl es biomasa de peces del plancton, Ben es biomasa de los organismos del bentos, Ppb es biomasa de los peces del bentos. Nut es nutrientes libres. En tanto que N es número de pejerreyes de la cohorte, S es susceptibilidad y Evi es peso eviscerado, Hig es peso del hígado, Gra es peso de la grasa, Gon es peso de la gónada, promedios para un individuo de la cohorte. Ho es ovocitos producidos por la población y T es tiempo.

Los pejerreyes juveniles sufren una mortalidad tan alta que por cada recluta que se incorpora a la población, las hembras deben liberar alrededor de 600 huevos. Para este submodelo se utilizó el propuesto en Freyre *et al.* (2003) que incorpora la variable de estado S (susceptibilidad), que agrega mortalidad adicional hasta que se disipa por el tiempo.

El modelo en su estado actual

Se combinaron los submodelos descriptos: lluvia; forma; plancton vs hidrófitas; peces del bentos y plancton, Figura 15. El modelo de supervivencia se combinó con el de crecimiento para describir cada cohorte. Se representan 22 cohortes correspondientes a los desoves de primavera y otoño de 11 años sucesivos. La biomasa de los ovarios se transforman en número de huevos que se incorporan a la cohorte 1 de primavera en el correspondiente desove con su biomasa inicial o a la cohorte 1 de otoño en este desove. En cada caso el consumo de plancton es proporcional a la oferta y a la biomasa del individuo promedio de la cohorte, multiplicada por N de la cohorte. La suma de los consumos de todas las cohortes se sustrae de la biomasa del plancton así como el consumo de los peces del plancton y las pérdidas por muerte natural que sedimentan por lo que se incorporan al bentos. Se estiman la biomasa del plancton, de los peces del plancton, del bentos y de los peces del bentos, así como los nutrientes libres.

El modelo funcionando

Una vez al año se transfieren los estados finales como estados iniciales de la cohorte siguiente y se incorporan los valores de reproducción a la más joven.

En una planilla de cálculo, mediante fórmulas y macros, se simuló el modelo integrando por el método de Euler (Odum 1981, Patten 1975-76, entre otros).

Durante la simulación se observa una ventana de monitoreo (Figura 16) que muestra el comportamiento de las principales variables en forma gráfica, en el año que se está simulando.

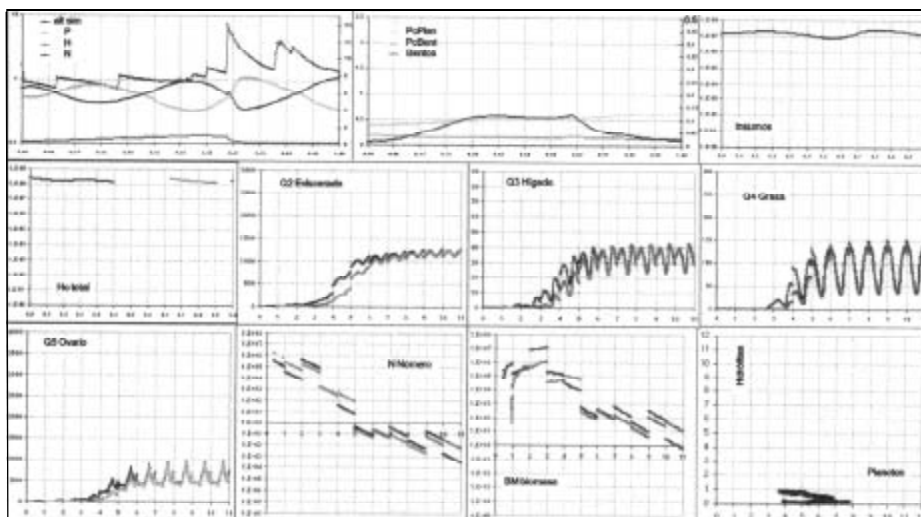


Figura 16. Ventana de monitoreo. En la gráfica superior izquierda la altura simulada (alt. sim.) está representada en escala logarítmica mientras que el plancton (P), las hidrófitas (H) y los nutrientes libres (N) lo están en escala natural. En la gráfica central de la fila superior se muestra la variación de los peces de plancton y el bentos, además de la biomasa del resto de organismos bentónicos. En la ventana superior derecha el insumo de plancton por la población de pejerrey. En la segunda fila, a la izquierda se muestra la biomasa de los ovarios. Todas esas gráficas tienen como abscisa el tiempo del año corriente. Las siguientes tres ventanas de la segunda línea y las tres izquierdas de la tercera tienen como abscisa la edad de las cohortes. La ventana inferior derecha es un diagrama de fases donde se observa la evolución del sistema Plancton vs Hidrófitas en el año corriente.

Simultáneamente se genera un archivo mensual de dichas variables y su gráfica, que muestra la evolución del sistema desde el inicio de la simulación, Figura 17. Las variables del crecimiento individual y la supervivencia se han sintetizado en biomasa total del pejerrey (BM), número total de individuos (N) y peso promedio de un individuo (PesMed).

A partir del archivo generado se pueden efectuar distintas manipulaciones, como por ejemplo el estudio estadístico de las variables simuladas. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 18 una matriz gráfica de regresiones entre todas las variables.

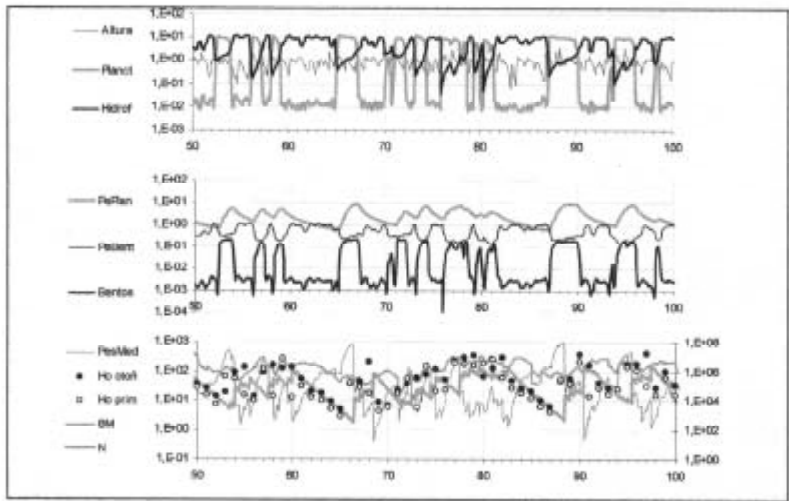


Figura 17. Comportamiento del modelo en una simulación de 50 años. Las escalas de ordenadas son logarítmicas, las de abscisas están en años. En la gráfica inferior PesMed es peso medio de los pejerreyes de la población en gr/individuo, Ho otoñ y prim representan el número de huevos liberados en los desoves de otoño y primavera respectivamente; BM es la biomasa y N es el número de individuos de la población de pejerrey.

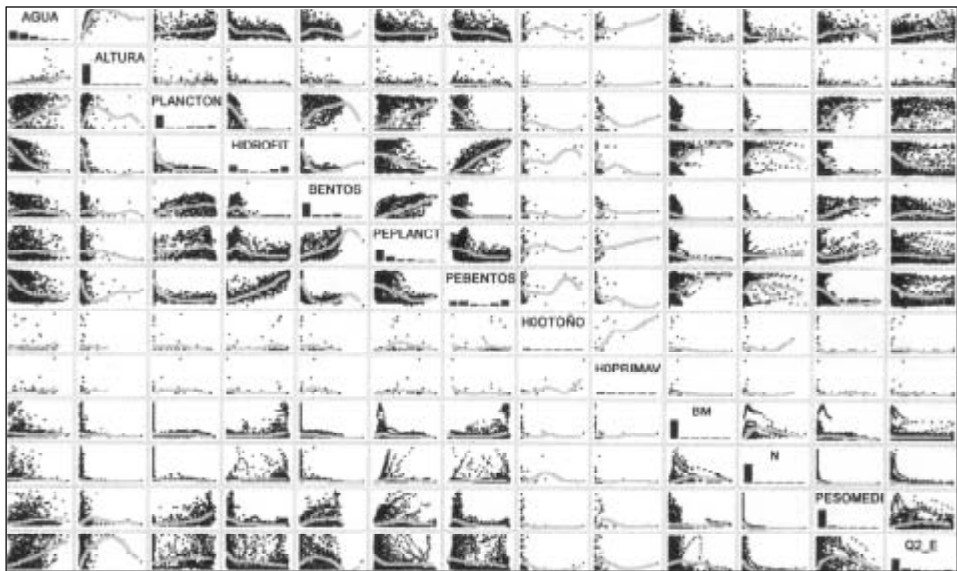


Figura 18. Matriz de regresiones de las variables del modelo en una simulación de 100 años.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- El comportamiento se ajusta a lo esperado, el modelo está verificado.
- Algunos parámetros requieren aún calibración, para lo cual se necesitan nuevos datos. Por ejemplo hace falta obtener una serie de datos de lluvias diarias locales de varios años.
- La información referida al pejerrey parece suficiente. ¿Se podrán obtener datos históricos que describan adecuadamente las variaciones multianuales de las poblaciones de pejerrey?
- Igualmente ¿se podrá conseguir información acerca de los cambios estructurales de las comunidades de peces en períodos suficientemente largos?
- ¿Existen registros, aunque no sean formales, de las dominancias de hidrófitas y simultáneamente, de las alturas excepcionales del agua?

BIBLIOGRAFÍA

- Bernard C. Patten. editor 1975-6. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. Academic Press New York, Tres Tomos.
- Destéfani, S. y L. R. Freyre. 1972. Relaciones tróficas de los peces de la laguna de Chascomús con un intento de referenciación ecológica y tratamiento bioestadístico del espectro trófico. *Acta Zool. Lilloana* 29: 17-33
- Freyre, L. R., M. E. Maroñas y E. D. Sendra. 2003. Modelo de supervivencia para los estadios post-larvales del pejerrey *Odontesthes bonariensis*. *Biología Acuática* 20: 89-92.
- Howard T. Odum. 1983. *Systems Ecology: an Introduction*. John Wiley & Sons. New York, 644 pp.
- Jørgensen Sven Eric. 1994. *Fundamentals of Ecological Modelling* (2da edición). Elsevier. Amsterdam, 628 pp.
- Pauly, D. 1981. Fish population dynamics in tropical waters: a manual for use with programmable calculators. *ICLARM Stud. Rev.* (8): 325 p.
- Ramon Margalef. 1991. *Teoría de los Sistemas Ecológicos*. Universitat de Barcelona, Barcelona, 290 pp.
- Ringuelet, R. A.; N. R. Iriart y A. H. Escalante. 1980. Alimentación del pejerrey (*Basilichthys bonariensis bonariensis*, Atherinidae) en laguna Chascomús (Bs. As., Arg.) Relaciones ecológicas de complementación y eficiencia trófica del plancton. *Limnobiós* 1(10): 447-460.